

## La tomographie, l'impression 3D et la réalité virtuelle au service de l'archéologie

Théophane Nicolas\*, Ronan Gagne\*\* , Cédric Tavernier\*\*\*, Valérie Gouranton\*\*\*\* et Bruno Arnaldi\*\*\*\*\*

\* INRAP (Institut national de recherches archéologiques préventives) – UMR 8215 *Trajectoires. De la sédentarisation à l'État*, Maison de l'Archéologie & Ethnologie René-Ginouvès, Nanterre.

\*\* Université de Rennes 1 / IRISA – INRIA Rennes Bretagne Atlantique (Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires – Institut national de recherches en informatique et en automatique).

\*\*\* Image ET, Mordelles – [www.image-et.fr/](http://www.image-et.fr/)

\*\*\*\* INSA (Institut national des sciences appliquées) de Rennes / IRISA – INRIA RENNES BRETAGNE ATLANTIQUE

### Introduction

Les technologies d'imagerie médicale sont de plus en plus utilisées dans le domaine de l'archéologie car elles permettent un accès non destructif à la structure interne d'artefacts souvent fragiles. Toutefois et la plupart du temps, cette utilisation reste limitée à une simple visualisation et porte généralement sur des pièces exceptionnelles (momies, artefacts de grande valeur). Les données obtenues par les technologies d'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou de tomodensitométrie sont constituées d'éléments d'information retranscrits de manière visuelle, mais dont la richesse intrinsèque pourrait être exploitée de manière plus large grâce à des technologies issues des dernières recherches en 3D, telles que la réalité virtuelle, la réalité augmentée, les interactions multimodales et la fabrication additive.

En combinant différents types de technologies d'acquisition numérique issues de l'imagerie médicale, il est en effet possible d'identifier et d'analyser scientifiquement, par des méthodes non destructives et efficaces, des objets archéologiques non visibles (par exemple un amas cinéraire dans une urne), d'évaluer la fragilité, l'état de conservation et la possibilité de restauration d'un artefact archéologique corrodé, de visualiser, analyser et manipuler physiquement des objets inaccessibles et/ou fragiles (CT, impression 3D), et ainsi de révéler notre patrimoine culturel caché et de l'observer dans son contexte (réalité virtuelle, augmentée ou mixte, 3D).

Le développement de ces technologies permet aujourd'hui d'envisager une démocratisation des procédés, tout particulièrement dans le domaine de l'archéologie préventive où les perspectives ne se limitent pas uniquement à la valorisation.

### Technologies mises en œuvre

#### **La tomodensitométrie**

La tomodensitométrie est le nom scientifique de la scanographie par rayons X. Son but est de permettre l'acquisition axiale d'un objet et de le soustraire à la problématique de superposition des éléments internes de l'objet scanographié qui peuvent provoquer des occlusions et donc des pertes d'information. Cette acquisition fournit des images en coupe d'un objet à trois dimensions dont le cumul est utilisé par un logiciel dédié pour générer une reconstruction 3D. La tomodensitométrie permet un enregistrement de manière systématique les densités des matériaux qui composent les objets archéologiques et une reconstruction en 3D. Cette méthode analyse la matière au cœur de l'objet sans l'altérer et fournit des paramètres qualitatifs et quantitatifs sur les matériaux utilisés afin d'en définir et d'en comprendre les structures internes, le mode de fabrication et l'état de conservation. La

qualité et la pertinence des images obtenues dépendent de plusieurs paramètres techniques qui vont influencer sur l'émission des rayons X, sur les informations mesurées dans le signal reçu et sur la transformation de ce signal en images. Ces paramètres doivent être adaptés en fonction de la nature de l'objet scanographié, de sa taille et de ses composants.

L'utilisation de la tomodensitométrie pour analyser des mobiliers archéologiques reste actuellement limitée. Les exemples de son application au patrimoine culturel portent essentiellement sur des momies et des squelettes humains ou animaux (Houle-Wierzbicki *et al.*, 2015 ; Xiujie *et al.* 2009 ; Ikram *et al.* 2015), ou sur des objets exceptionnels (Mödlinger 2008 ; Hassmann *et al.* 2012) ; peu de travaux examinent les autres types de mobilier (Huisman *et al.* 2014 ; Lee *et al.* 2008 ; Treyvaud 2010 ; Treyvaud *et al.* 2013). Ces dernières années, l'usage de cette technologie s'est néanmoins développé dans le domaine d'étude des incinérations (Anderson & Fell 1995 ; Harvig *et al.* 2012 ; Harvig & Lynnerup 2013 ; Le Puil-Textier *et al.* 2015 ; Minozzi *et al.* 2010) et lors de découvertes d'ensembles particulièrement complexes nécessitant des prélèvements en « bloc », souvent en lien avec des opérations de conservation ou de fouilles complexes (Stelzner *et al.* 2010 ; Re *et al.* 2015). Le plus souvent, les outils associés à la tomodensitométrie sont utilisés uniquement pour créer des rendus graphiques 2D. Ces outils ne sont pas intégrés aux processus d'étude et d'analyse des objets archéologiques.

Dans la démarche de reconstitution des chaînes opératoires de fabrication de la poterie, la lecture et l'identification des traces jouent un rôle important. En ce qui concerne la céramique, plusieurs applications ont développé une approche des techniques de façonnage ou des dégraissants grâce à la tomographie (Bouzakis *et al.* 2011 ; Kahl & Ramming 2012). Les applications de la photogrammétrie ou d'une acquisition par lasergrammétrie y sont en revanche plus rares (Barreau *et al.* 2014 ; Mara & Sablatnig 2008). Ces expérimentations ont montré la pertinence et l'efficacité de la numérisation pour mettre en évidence des structures liées à la topographie de surface ou dans l'épaisseur des parois des vases ; néanmoins, elles restent sous-exploitées.

On remarque surtout un fort intérêt de la géologie et de la sédimentologie pour la tomodensitométrie (Denison *et al.* 1997 ; Hu *et al.* 2006 ; Ketcham *et al.* 2005). Certaines publications ont notamment facilité le développement de son application en archéologie (Boest *et al.* 1994 ; Kak & Slaney 1999 ; Ketcham & Carlson 2001), permettant ainsi la caractérisation des matériaux et des modes de fabrication des objets (Treyvaud *et al.* 2013 ; Treyvaud 2010 ; 2015). Tous ces travaux exploitent les images acquises dans leur format de base, sans les combiner avec d'autres technologies. D'autres travaux récents illustrent des possibilités de ponts entre l'imagerie médicale et les technologies 3D telles que la photogrammétrie, la réalité virtuelle ou augmentée, ou l'impression 3D qui sont fréquemment utilisées en archéologie et dans le domaine du patrimoine culturel (Hassmann *et al.* 2012 ; Nicolas *et al.* 2014 ; 2015). Enfin, nos interprétations reposent sur des recherches en archéométrie effectuées par une nouvelle génération de chercheurs ayant grandi avec les nouvelles technologies (Bonneau *et al.* 2014 ; Querrec *et al.* 2013 ; Moreau *et al.* 2009).

### ***L'impression 3D***

L'impression 3D est une technologie qui permet, à l'aide d'une machine appelée imprimante 3D, de fabriquer un objet physique à partir d'un modèle numérique. Cette technologie en rupture avec les techniques traditionnelles de fabrication est née dans l'industrie. Au début des années 1980, des ingénieurs français et américains expérimentent la fabrication par addition de couches successives de matière. En 1984, une demande de brevet portant sur une machine destinée au prototypage rapide et fonctionnant selon un procédé nommé stéréolithographie apparatus (SLA) est déposée mais on ne parle pas encore d'impression 3D. En 1986, cette imprimante d'un genre nouveau est commercialisée après la mise au point du STL (*Standard Tessellation Language*), un format de fichier numérique devenu la

référence pour l'impression 3D. L'expression « impression 3D » apparaît pour la première fois en 1996. Elle recouvre différentes techniques de fabrication additive qui se distinguent les unes des autres par la technologie mise en œuvre : le dépôt de filament, le liage de poudre, le frittage/fusion laser de poudre, la stéréolithographie, le *digital light processing*, la projection de matière.

Ces technologies encore jeunes ont pour vocation l'accélération de l'innovation et de la production de pièces complexes ou personnalisées, l'optimisation topologique, la réduction du poids des pièces et de leurs coûts. Elles sont en constante évolution (impression transparente, bio-printing) et voient une extension permanente de leurs champs d'application (médical, aéronautique, alimentaire...).

L'impression 3D présente de nombreuses contraintes liées à sa complexité d'utilisation, son coût et la performance des imprimantes (volume, qualité de l'impression). Son utilisation en archéologie est assez récente et tend à se développer dans le domaine du patrimoine (Neumüller *et al.* 2014 ; Scopigno *et al.* 2015). Si l'on exclut le monde industriel, la paléontologie a été pionnière, en percevant tout le potentiel de modélisation des fossiles, facilitant les comparaisons morphologiques entre les différents taxons mais aussi l'interaction scientifique grâce à l'accès partagé aux données numériques (D'Urso *et al.* 2000 ; Bristowe *et al.* 2004 ; Mitsopoulou *et al.* 2015). Par la suite, le milieu des restaurateurs-conservateurs a trouvé dans cette technologie la possibilité de restaurer ou de copier un objet de manière plus efficiente (Arbace *et al.* 2013 ; Laycock *et al.* 2013). Dans le cas d'instruments de musique anciens, la copie par impression 3D peut notamment donner des résultats intéressants par rapport à des techniques de copie artisanale (Safa *et al.*, à paraître). L'usage de l'impression 3D comme outil de recherche est à ce jour limité en raison de son coût élevé, mais les travaux récents ouvrent des perspectives sur les possibilités de ponts entre l'imagerie médicale et les technologies 3D (Biron *et al.* 2014), et également sur l'impression 3D considérée non plus comme un « produit fini » mais comme un outil ou support de recherche (Hassmann *et al.* 2012 ; Nicolas *et al.* 2014 ; 2015). Le champ des possibilités s'étend avec la mise en œuvre d'impressions 3D de nouvelles générations et avec de nouvelles approches empruntées au domaine médical, qui offrent la possibilité d'impressions complexes (Bernhard *et al.* 2016 ; Nicolas *et al.* 2016).

### **La réalité virtuelle**

Une application de réalité virtuelle est constituée de trois éléments fondamentaux (Arnaldi *et al.* 2003) : le ou les utilisateurs, les dispositifs d'interaction et le traitement des modèles de simulation (gestion de la scène virtuelle). Ces trois éléments s'enchaînent dans une boucle temporelle d'exécution refermée par l'utilisateur. Le positionnement de celui-ci au centre de cette boucle est fondamental en réalité virtuelle. Il perçoit l'univers simulé à travers ses sens qui sont stimulés par les données numériques à travers les différents périphériques d'interaction (Bowman *et al.* 2004). De plus, il interagit avec ses capacités motrices ; il peut être placé dans certaines situations pour réaliser des activités spécifiques allant des déplacements dans des environnements particuliers jusqu'à des interactions plus complexes avec la simulation, à l'aide de dispositifs haptiques. Ainsi, l'archéologue peut à la fois percevoir la reconstitution d'un environnement pour évaluer sa cohérence symbolique ou culturelle et interagir avec la simulation pour évaluer sa cohérence physique ou fonctionnelle. Les périphériques et dispositifs d'interaction peuvent être très variés. Actuellement, les casques de réalité virtuelle sont en plein essor, avec la mise sur le marché de plusieurs casques grand public de bonne qualité. Les salles de réalité virtuelle immersive sont également de plus en plus accessibles, avec notamment, en France, la présence de plusieurs plateformes ouvertes à la recherche pluridisciplinaire (Immersia<sup>1</sup>, CIREVE<sup>2</sup>, CRVM<sup>3</sup>,

---

<sup>1</sup> Cette plate-forme de grande taille de l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (IRISA) et du Centre Inria-Rennes Bretagne Atlantique offre aux chercheurs de toutes disciplines de

etc.). D'autres équipements intermédiaires peuvent fournir des supports intéressants dans le domaine de l'archéologie.

L'archéologie virtuelle, introduite par Paul Reilly en 1990, devait à l'origine servir à l'enregistrement de fouilles ainsi qu'au (re)jeu virtuel de ces fouilles à l'aide de technologies multimédias (Reilly 1990). De manière similaire, Louise Krasniewicz a proposé une infrastructure de visualisation à 360° pour aider les archéologues dans leur recherche (Krasniewicz 2001). Dans ce cas, l'archéologie virtuelle n'était pas utilisée pour conserver une connaissance mais pour en acquérir une nouvelle. Plus récemment, Laia Pujol-Tost et Magdalena Sureda-Jubraný ont illustré l'intérêt de l'interaction, de la perception et de la simulation en réalité virtuelle pour l'archéologie (Pujol-Tost & Sureda-Jubraný 2008). Robert Vergnieux a montré l'avantage de la simulation pour la validation de gestes, de mouvements, de cohérence physique et de faisabilité technique des constructions (Vergnieux 2011). Suivant ces nouvelles tendances, Maurizio Forte a suggéré de remplacer le terme d'« archéologie virtuelle », correspondant à une « reconstruction du passé », par l'expression « cyber-archéologie », correspondant à une « simulation du passé » (Forte 2011). Plus récemment, des techniques de simulation immersive et d'interactions en réalité virtuelle appliquées à un navire de la compagnie des Indes et à la plantation sucrière ont montré les capacités de ces technologies à offrir une perception de l'environnement naturel et fonctionnel d'une reconstitution. (Barreau *et al.* 2015 ; 2016). La complexité de ces structures reconstituées, en termes de volumes, de paysages, d'environnements sonores, etc., implique une bonne appréhension à la fois des problématiques archéologiques mises en œuvre et des possibilités et contraintes de la réalité virtuelle pour y répondre. Combinée à l'impression 3D, la réalité virtuelle permet de recontextualiser les objets et de mieux comprendre leur fonctionnement grâce à une manipulation tangible dans un environnement virtuel (Nicolas *et al.* 2015).

## Présentation de la méthodologie

Les recherches menées en partenariat entre l'Institut national de recherches archéologiques préventives (INRAP), l'Université de Rennes 1, l'Institut national de recherches en informatique et en automatique (INRIA), le CNRS et l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Rennes sont basées sur des technologies d'imagerie avancées (tomodensitométrie) et des restitutions 3D interactives, physiques et virtuelles (réalité virtuelle, augmentée, mixte, impressions 3D et interactions tangibles). Elles permettent aujourd'hui d'affiner la lecture d'artefacts complexes, composites et/ou altérés. Nous illustrerons en quoi ces technologies s'avèrent des outils intéressants dans la prise de décision en matière de préservation d'objets sensibles (Biron *et al.* 2015), pour l'identification des techniques et/ou technologiques d'assemblages (Nicolas *et al.* 2014 ; 2015), la caractérisation fonctionnelle d'artefacts ou d'objets cachés.

Les méthodes d'introspection numérique interactive, qui combinent la tomodensitométrie avec des technologies de visualisation 3D comme la réalité virtuelle, les interactions

---

nouvelles possibilités pour leurs recherches en terme de qualité immersive et d'interaction multimodale (Gaugne *et al.* 2014).

<sup>2</sup> Le Centre Interdisciplinaire de réalité virtuelle (CIREVE) est un plateau technique de l'Université de Caen Normandie créé en mars 2006 et rattaché depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2012 à l'Unité de formation et de recherche (UFR) *Humanités et sciences sociales*.

<sup>3</sup> Le Centre de réalité virtuelle de la Méditerranée (CRVM), rattaché à l'Institut des sciences du mouvement (CNRS et Université Aix-Marseille) est une plateforme technologique dédiée à l'étude du comportement humain en situation immersive.

tangibles et l'impression 3D, permettent une caractérisation des matériaux et une cartographie complète non destructrice du mobilier archéologique (fig. 1).

### **Cas d'utilisation**

La méthodologie présentée dans cet article a été utilisée dans différents cas d'étude qui nous ont permis d'en illustrer et d'en démontrer l'intérêt selon deux principaux usages : la visualisation et la manipulation.

La tomographie combinée aux différentes modalités 3D permet de visualiser l'intérieur des artefacts et objets et d'accéder à différents éléments intriqués. Le rendu volumique obtenu par reconstruction 3D de la tomographie permet d'associer des colorations et des niveaux de transparence aux différentes valeurs de densité, donnant ainsi un premier niveau de visualisation spatialisé sur écran. En y associant la fonctionnalité de segmentation, il devient possible de se concentrer sur certaines parties spécifiques de l'objet à étudier et d'en extraire un élément. La génération d'un maillage 3D à partir des informations de densité autorise la production de copies physiques soit d'éléments particuliers, soit de l'objet étudié dans son intégralité. L'étude de l'urne de Guipry, présentée dans la figure 2, est caractéristique de cet usage (Nicolas *et al.*, à paraître). Grâce à la tomographie, son contenu a pu être visualisé très rapidement et ses différents composants (des fragments d'os et deux objets en métal) ont été identifiés. Une segmentation de la fibule a permis d'obtenir une impression 3D de l'objet bien avant son extraction physique. Une impression complète de l'urne en transparence permet de conserver une représentation tangible de l'organisation spatiale interne de l'urne après sa destruction.

L'impression 3D produit une représentation tangible de l'objet qui peut être manipulée sans risque de dommage pour l'original. Nous avons illustré l'intérêt de cette technique par une copie démontable d'un poids gaulois qui a permis de mieux comprendre sa technique de fabrication (Nicolas *et al.* 2014), par des copies à différentes échelles d'objets trop petits pour être manipulés, ou encore par des copies d'objets dont il ne restait qu'une empreinte fragile (Nicolas *et al.* 2015) (fig. 3).

Combinée à la réalité virtuelle, la copie d'un objet peut servir d'interface aidant à mieux comprendre le contexte d'utilisation de l'original. Nous avons ainsi proposé une reconstitution d'une balance romaine avec manipulation interactive du poids, présentée dans le cadre d'une action de médiation scientifique (fig. 4).

### **Discussion**

Ces outils offrent à l'archéologue de nombreux avantages. Ils lui permettent, par une méthode non destructive, d'exploiter scientifiquement des objets fragiles et/ou non visibles avant une intervention préventive préalable (conglomérat d'objets, objet oxydé) ou une fouille (amas cinéraire dans une urne), en visualisant un modèle numérique ou bien en travaillant sur le fac-similé réalisé à partir d'une impression 3D plutôt qu'en manipulant l'objet original.

Ils rendent possible la visualisation, l'analyse et la manipulation d'objets archéologiques sous forme de modèles numériques en coupe ou en trois dimensions, avec possibilité de prise de mesures. La mise en œuvre d'un modèle 3D permet un archivage numérique pérenne de l'objet, et ce quelles que soient les interventions ultérieures (fouille dans le cas d'un contenant ou d'un conglomérat), pouvant être visualisé et analysé à distance par plusieurs opérateurs.

La tomodensitométrie aide à déterminer la densité du ou des matériaux, à évaluer la fragilité ou l'état de conservation des objets archéologiques et à orienter les choix de traitements.

Malgré la démocratisation de ces outils et leur développement rapide, il subsiste toutefois des problèmes d'accessibilité à l'appareillage et des contraintes techniques et technologiques. Concernant l'acquisition via un scanographe, la matière ou la géométrie de l'objet peuvent engendrer des artefacts qui nuisent, voire qui empêchent une lecture correcte. Notre expérience montre également toute l'importance de la capacité de réglage des constantes du scanographe, que seul du matériel à dévolution industrielle permet. Le second paramètre clé est la capacité de l'opérateur à faire de la reconstruction 3D, afin d'obtenir des images optimales. La tomодensitométrie offre une précision limitée aux caractéristiques physiques du capteur ; pour pallier à cet inconvénient, il est possible de faire appel à la micro-tomodensitométrie qui augmente la précision d'analyse. Toutefois, si la tomодensitométrie permet d'acquérir des images sur des objets de grande taille, ce n'est pas le cas de la micro-tomodensitométrie, qui est réservée à des éléments de petites dimensions. Concernant l'impression 3D, les limitations sont plutôt d'ordre technologique : précision de l'impression elle-même, taille de l'objet fini, mais également contraintes sur le modèle 3D qui sert à faire l'impression et qui nécessite de fortes compétences techniques. L'usage de la réalité virtuelle est également limité par ces trois paramètres de l'accès à la technologie, des compétences requises et des limitations de l'appareillage. Se pose enfin la question de la position spécifique de l'archéologue qui emploie ces nouveaux outils, et de la manière dont ils modifient sa perception du mobilier et de son contexte.

## **Conclusion**

Le processus mis en œuvre ici interagit sur des objets volumiques/surfaciques multi-échelles, tout en étant non destructif. Il permet d'analyser des artefacts non visibles, de visualiser et de manipuler des artefacts inaccessibles, de sauvegarder virtuellement un artefact avant toute intervention et d'y accéder à distance. Ces médias sont un support et un soutien aux opérations de fouille (incinérations) ou de restauration (état des matériaux), en remettant dans leur contexte des artefacts et des interactions. Ces technologies ouvrent donc de nouvelles perspectives de recherches et de méthodologie. Mais, issues d'un milieu médical ou industriel, elles restent toutefois à adapter à des usages spécifiquement archéologiques. Quoi qu'il en soit, ces outils 3D sont porteurs d'un changement de paradigme pour l'archéologue et auront sans aucun doute un impact sur sa manière de percevoir le mobilier et son environnement.

## **Références bibliographiques**

- ARNALDI B., FUCHS P., TISSEAU J. 2003. *Traité de la réalité virtuelle*, Paris, Presses de l'École des Mines de Paris, vol. 1 à 4 (3<sup>e</sup> éd.).
- ANDERSON T. & FELL C. 1995. « Analysis of Roman cremation vessels by computerized tomography », *Journal of Archaeological Science*, 22 : 609-617.
- ARBACE L., SONNINO E., CALLIERI M., DELLEPIANE M., FABBRI M., IDELSON A. I., SCOPIGNO R. 2013. « Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue », *Journal of Cultural Heritage*, 14, 4 : 332-345.

- BARREAU J.-B., NICOLAS T., BRUNIAUX G., PETIT E., PETIT Q., BERNARD Y., GAUGNE R., GOURANTON V. 2014. « Photogrammetry Based Study of Ceramics Fragments », *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3 (4) : 643-656.
- BARREAU J.-B., NOUVIALE F., GAUGNE R., BERNARD Y., LLINARES S., GOURANTON V. 2015. « An Immersive Virtual Sailing on the 18th-Century Ship Le Boullongne », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Massachusetts Institute of Technology Press (MIT Press), 24 (3) [<https://hal.inria.fr/hal-01218209/document>].
- BARREAU J.-B., PETIT Q., BERGEROT S., BERNARD Y., AUGER R., LE ROUX Y., GAUGNE R., GOURANTON V. 2016. « 3D reconstitution of the Loyola sugar plantation and virtual reality applications », in : S. CAMPANA, R. SCOPIGNO, G. CARPENTIERO & M. CIRILLO (ed.), CAA 2015. Keep the Revolution Going. Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Oxford, Archaeopress : 117-124.
- BERNHARD J.-C., ISOTANI S., MATSUGASUMI T., DUDDALWAR V., HUNG A. J., SUER E., BACO E., SATKUNASIVAM R. 2016. « Personalized 3D printed model of kidney and tumor anatomy: a useful tool for patient education », *World Journal of Urology*, 34(3) : 337-345.
- BIRON M., HURTIN S., NICOLAS T., TAVERNIER C. 2014. « La tomographie des objets archéologiques complexes et/ou altérés : outil d'identification, d'analyse et d'aide à la décision pour les mesures conservatoires », in : *Restaurer l'ordinaire. Exposer l'extraordinaire ? Journée des Restaurateurs en Archéologie (JRA), Arles, 2014*.
- BONNEAU A., MOREAU J.-F., HANCOCK R., AUGER R., EMARD B. 2014. « Investigating the influence of Neutron Activation Analysis on European Trade Glass Beads », in : *Proceedings of the 39th International Symposium for Archaeometry*, Leuven, 2012 : 1-6.
- BOUZAKIS D.-K., PANTERMALIS D., EFSTATHIOU K., VARITIS E., PARADISIADIS G., MAVROUDIS I. 2011. « An Investigation of Ceramic Forming Method Using Reverse Engineering Techniques: The Case of Oinochoai from Dion, Macedonia, Greece », *Journal of Archaeological Method & Theory*, 18 : 111-124.
- BOEST X., ROSS N., LONG B.F., DUMAIS J.F. 1994. « Tomo-densitométrie axiale : relation entre l'intensité tomographique et la densité de la matière », *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31 : 426-443.
- BRISTOWE A., PARROTT A., HACK J., PENCHARZ M., RAATH M.A. 2004. « A non-destructive investigation of the skull of the small theropod dinosaur, *Coelophysis rhodesiensis*, using CT scans and rapid prototyping », *Palaeontologia Africana*, 40 : 159-163.
- BOWMAN D., KRUIJFF E., LAVIOLA J., POUPYREV I. 2004. *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, USA.
- DENISON C., CARLSON W.D., KETCHAM R.A. 1997. « Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography; Part I & II. Methods and techniques », *Journal of Metamorphic Geology*, 15 (1) : 29-57.

- D'URSO P. S., THOMPSON R. G., EARWAKER W. J. 2000. « Stereolithographic (SL) biomodelling in palaeontology: A technical note », *Rapid Prototyping Journal*, 6 : 212-215.
- FORTE M. 2011. « Cyber-archaeology: Notes on the simulation of the past », *Virtual Archeology Review*, Vol. 2, n° 4 : 7-18.
- GAUGNE R., V. GOURANTON, G. DUMONT, A. CHAUFFAUT, B. ARNALDI. 2014. *Immersia, an open immersive infrastructure: doing archaeology in virtual reality*. Archeologia e Calcolatori, supplemento 5 : 1-10.
- HARVIG L., LYNNERUP N., AMSGAARD EBSSEN J., 2012. « Computed tomography and computed radiography of late Bronze Age cremation urns from Denmark: an interdisciplinary attempt to develop methods applied in bioarchaeological cremation research », *Archaeometry*, 54 (2) : 369-387.
- HARVIG L. & LYNNERUP N. 2013. « On the volume of cremated remains: a comparative study of cremated bone volume measured manually and assessed by Computed Tomography », *Journal of Archaeological Science*, 40 : 2713-2722.
- HASSMANN H., HEINTGEIS T., RASINK B., WINGHART S., WULF F.-W. 2012. « Der bronzezeitliche Hortfund von Gessel, Stadt Syke, Landkreis Diepholz, Denkmalpflege », *Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen*, 1 : 23-28.
- HU S., RAZA A., MIN K., KOHN B.P., REINERS P.W., KETCHAM R.A., WANG J., GLEADOW A.J.W. 2006. « Late Mesozoic and Cenozoic Thermotectonic Evolution along a Transect from the North China Craton through the Qinling Orogen into the Yangtze Craton, Central China », *Tectonics*, 25, DOI: 10.1029/2006TC001985
- HUISMAN, D.J., NGAN-TILLARD, D., TENSEN, M.A., RAEMAEEKERS, D. & LAARMAN, F.J., 2014. « A question of scales: Studying Neolithic subsistence using micro CT scanning of midden deposits », *Journal of Archaeological Science*, 49, p. 585-594.
- HOULE-WIERZBICKI Z., TREYVAUD G., RAGUIN E., AUGER R., RIBOT I. 2015. « Development of the X-ray CT data base for the paleopathological analysis: Example of the St. Matthew protestant churchyard, Quebec City (1771-1861) », in : *2nd International Conference on Tomography of Materials and Structures*, Québec, 29 juin-2 juillet 2015.
- IKRAM S., SLABBERT R., CORNELIUS I., DU PLESSIS A., SWANEPOEL L. C., WEBER H. 2015. « Fatal force-feeding or Gluttonous Gaggling? The death of Kestrel SACHM 2575 », *Journal of Archaeological Science*, 63 : 72-77.
- KAHL W.-A. & RAMMINGER B. 2012. « Non-destructive fabric analysis of prehistoric pottery using high-resolution X-ray microtomography: a pilot study on the late Mesolithic to Neolithic site Hamburg-Boberg », *Journal of Archaeological Science*, 39 : 2206-2219.
- KAK A.C. & SLANEY M. 1999. *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press, New York.



- KETCHAM R.A. & CARLSON W.D. 2001. « Acquisition, Optimization and Interpretation of X-ray Computed Tomographic Imagery: Applications to the Geosciences », *Computers and Geosciences*, 27 : 381-400.
- KETCHAM R.A. & ITURRINO G.J. 2005. « Nondestructive High-resolution Visualization and Measurement of Anisotropic Effective Porosity in Complex Lithologies Using High-resolution X-ray Computed Tomography », *Journal of Hydrology*, 302 : 92-106.
- KRASNIEWICZ L. 2001. « Immersive imaging technologies for archeological research », in : Z. STANČIČ & T. VELJANOVSKI (eds), *Computing Archaeology for Understanding the Past. CAA 2000. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 28th Conference, Ljubljana, April 2000*. Archaeopress, Oxford (BAR Int. Series, 931) : 163-169.
- LAYCOCK S. D., BELL G. D., MORTIMORE D. B., GRECO M. K., CORPS N., FINKLE I. 2013. « Combining x-ray microct technology and 3D printing for the digital preservation and study of a 19th century cantonese chess piece with intricate internal structure », *ACM J. Comput. Cult. Herit.* 5, 4, 13:1–13:7.
- LEE S.S., GANTZER C.J., THOMPSON A.L., ANDERSON S.H., KETCHAM R.A. 2008. « Soil Surface-seal Characterization Using Analysis of High-resolution Computed Tomography », *Soil Science Society of America Journal*, 72, 5 : 1478-1485.
- LE PUIL-TEXIER M., NICOLAS T., TAVERNIER C. 2015. « L'apport de l'examen tomodensitométrique à la fouille et l'analyse des dépôts de crémation en urne », in : *Nouvelles approches de l'archéologie funéraire, 6<sup>e</sup> rencontre du Gaaf, Paris, 2014*.
- MARA H. & SABLATNIG R. 2008. « Evaluation of 3D Shapes of Ceramics for the Determination of Manufacturing Techniques », in : *Proc. of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, Germany, April 2-6, 2007*, Dr. Rudolf Habelt GmbH, Bonn : 91-97.
- MINOZZI S., GIUFFRÀ V., BAGNOLI J., PARIBENI E., GIUSTINI D., CARAMELLA D., FORNACIARI G. 2010. « An investigation of Etruscan cremations by Computed Tomography (CT) », *Antiquity*, 84 : 195-201.
- MITSOPOULOU V., MICHAILIDIS D., THEODOROU E., ISIDOROU S., ROUSSIAKIS S., VASILOPOULOS T., POLYDORAS S., KAISARLIS G., SPITAS V., STATHOPOULOU E., PROVATIDIS C., THEODOROU G. 2015. « Digitizing, modelling and 3D printing of skeletal digital models of *Palaeoloxodon tiliensis* (Tilos, Dodecanese, Greece) », *Quaternary International*, 379 : 3-13.
- MÖDLINGER M. 2008. « Micro-X-ray Computer Tomography in Archaeology: Analyses of a Bronze Age Sword », *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 50/5 : 323-326.
- MOREAU J.-F., AUGER R., CHABOT J., HERZOG A. 2009. *Proceedings of the 36th Symposium of Archaeometry/Actes du 36<sup>e</sup> Colloque d'archéométrie*. CELAT, Université Laval, Québec (Cahiers d'archéologie du CELAT, 25 ; Série Archéométrie, 5).

- NEUMÜELLER M., REICHINGER A., RIST F., KERN C. 2014. « 3D printing for cultural heritage: Preservation, accessibility, research and education », *in : 3D Research Challenges in Cultural Heritage, vol. 8355 of Lecture Notes in Computer Science*. Springer : 119-134.
- NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., GOURANTON V., ARNALDI B. 2014. « Preservative approach to study encased archaeological artefacts », *in : Proceedings of EUROMED 2014 International Conference on Cultural Heritage, Limassol, Cyprus, November 2014. Lecture Notes in Computer Science, 8740* : 332-341.
- NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., PETIT Q., GOURANTON V., ARNALDI B. 2015. « Touching and interacting with inaccessible Cultural Heritage », *Presence, Teleoperators and Virtual Environments*, MIT Press, vol. 24, 3.
- NICOLAS T., GAUGNE R., TAVERNIER C., GOURANTON V., ARNALDI B. À paraître. « Internal 3D Printing of Intricate Structures », *in : Proceedings of EUROMED 2016 International Conference on Cultural Heritage, Lecture Notes in Computer Science, Limassol, Cyprus*.
- PUJOL TOST L. & SUREDA JUBRANY M. 2008. « Vers une réalité virtuelle véritablement interactive », *in : Virtual Retrospect 2007, Actes du colloque e Pessac, 14-16 nov. 2007*. Bordeaux, Ausonius (Archéovision) : 77-81.
- QUERREC L., FILION L., AUGER R. 2013. « Pre-European settlement palaeoenvironments along the lower Saint-Charles River, Quebec City (Canada) », *Ecoscience*, 20 (1) : 65-84.
- RE A., CORSI J., DEMMELBAUER M., MARTINI M., MILA G., RICCI C. 2015. « X-ray tomography of a soil block: a useful tool for the restoration of archaeological finds », *in : Heritage Science*, 3:4, Science Letters, 246 : 102-108.
- REILLY P. 1990. « Towards a virtual archaeology », *in : Computer Applications in Archaeology*. Archaeopress, Oxford (BAR Int. Series, 565) : 133-139.
- SAFA E., BARREAU J.-B., GAUGNE R., DUCHEMIN W., TALMA J.-D., ARNALDI B., DUMONT G., GOURANTON V. À paraître. « Digital and handcrafting processes applied to sound-studies of archaeological bone flutes », *in : Proceedings of EUROMED 2016 International Conference on Cultural Heritage, Lecture Notes in Computer Science, Limassol, Cyprus*.
- SCOPIGNO R., CIGNONI P., PIETRONI N., CALLIERI M., DELLEPIANE M. 2015. « Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey », *Computer Graphics Forum* : 1-17.
- STELZNER J., EBINGER-RIST N., PEEK C., SCHILLINGER B. 2010. « The application of 3D computed tomography with X-rays and neutrons to visualize archaeological objects in blocks of soil », *Studies in Conservation*, Vol. 55, Issue 2 : 95-106.
- TREYVAUD G. 2010. « Doubles témoins de l'histoire, étude technologique en archéométallurgie », *Archéologiques*, 23, Revue de l'Association des Archéologues du Québec.

- TREYVAUD G. 2015. « The use of metals and metal products on urban and rural archaeological sites: reconstructing technologies employed by native american and european artisans in New France », in : *International Conference on Tomography of Materials and Structures, Québec, Canada*.
- TREYVAUD G., DUPRAS S., AUGER R. 2013. « De l'Égypte à Québec, un quatuor d'oudja à l'îlot des Palais », *Archéologiques*, 26, Revue de l'Association des Archéologues du Québec.
- VERGNIEUX R. 2011. « Archaeological research and 3d models (restitution, validation and simulation) », *Virtual Archeology Review*, Vol. 2, n° 4 : 39-43.
- XIUJIE W. & A. LYNNE. 2009. « Schepartz, Application of computed tomography in paleoanthropological research », *Progress in Natural Science*, Volume 19, Issue 8 : 913-921.

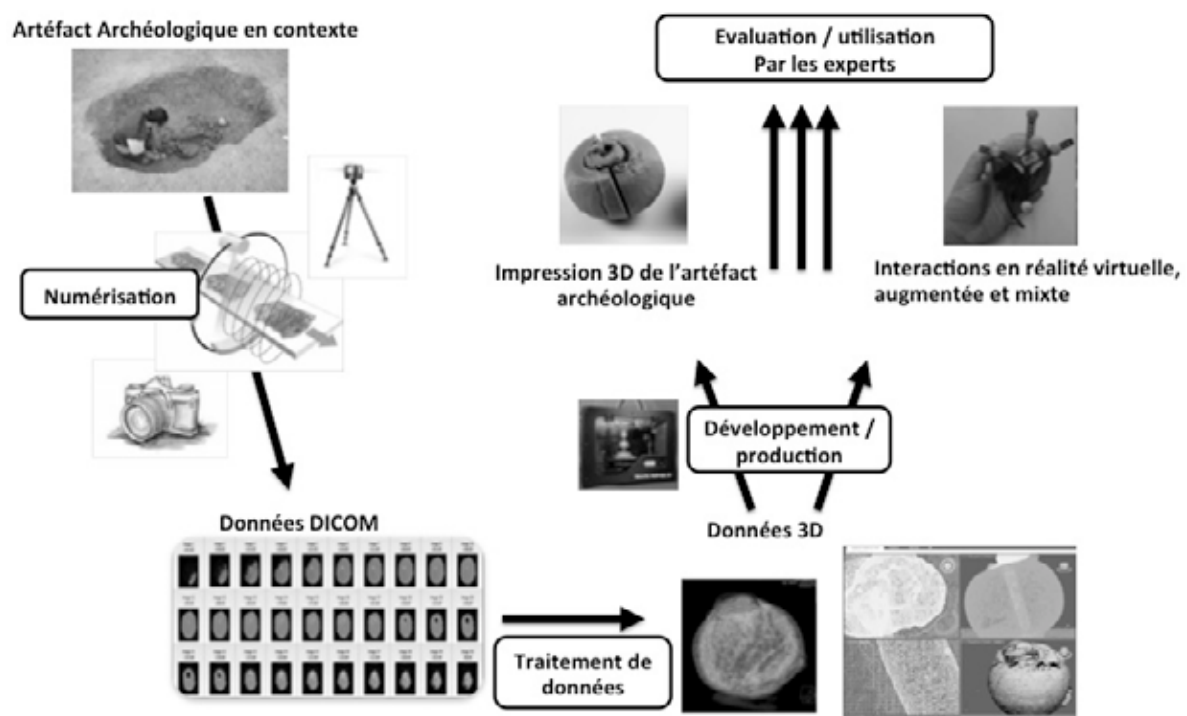


Figure 1. Vue générale du processus d'introspection numérique interactive en contexte archéologique.

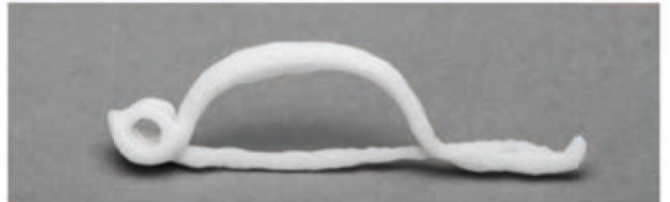
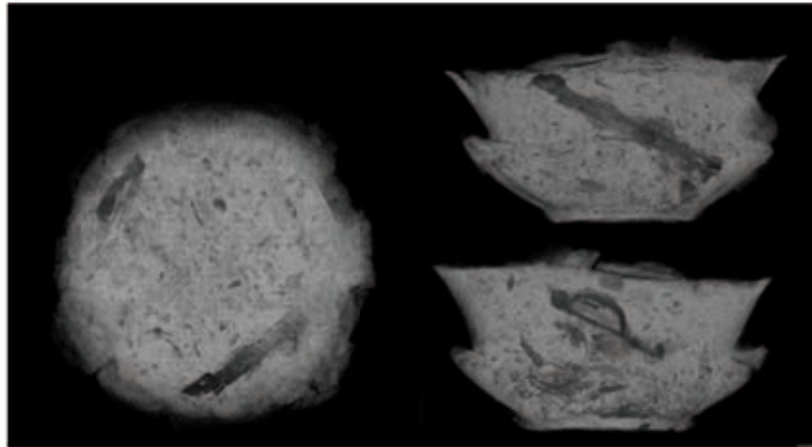


Figure 2. Rendu volumique de l'urne de Guipry, impression 3D de l'urne et de la fibule (© Inrap/IRISA/Image ET).

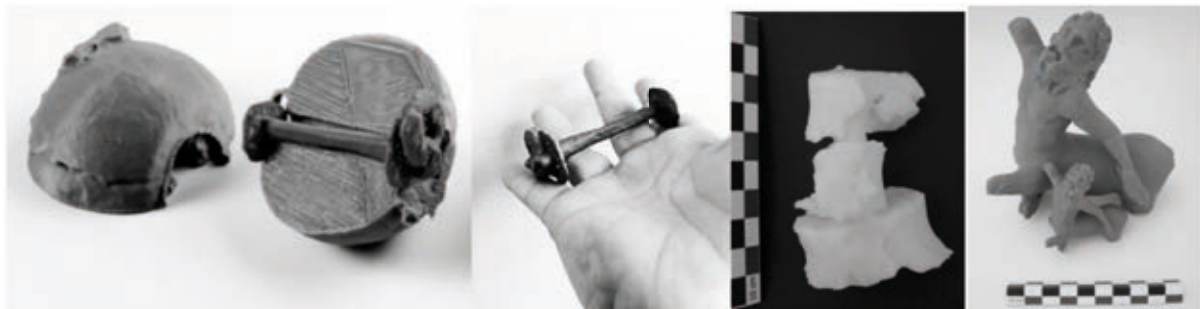


Figure 3. Impression 3D d'un poids démontable, de vertèbres et d'une statuette de centaure à différentes échelles (© Inrap/IRISA).



Figure 4. Une balance de la période gallo-romaine utilisée dans son contexte historique grâce à la réalité virtuelle immersive (© Inrap/IRISA/CRéAAH).